

경쟁시장에서의 전력시스템 예방정비계획 적용사례 조사 연구

박영수, 김진호
부산대학교

An Survey on the Maintenance Scheduling of Generating Units in Competitive Electricity Market

Young-Soo Park, Jin-Ho Kim
Pusan National University

Abstract - In this paper, we surveyed researches on the generation maintenance scheduling in competitive electricity markets. Maintenance scheduling can be one of the strategies submitted by market participants in electricity market. Many researches on the maintenance scheduling were preceded with or without transmission system. They have their own specific algorithm for ISO to operate, and control the maintenance schedules. This paper is focused on the survey on the generator and transmission system maintenance scheduling in competitive electricity markets.

적 모형(mathematical technique)을 집중적으로 살펴보았다. 이후 본문의 내용에서는 국내의 전력시스템 예방정비계획 관련 논문을 문제 접근 방법상의 형태로 분류하여 자세히 살펴보았다. 이번 논문에서는 전력시스템을 발전 및 송전과 관련된 시스템으로 제한한다. 실제로 최근까지 발표된 전력시스템 예방정비계획 관련 논문을 살펴보면, 발전기의 예방정비계획을 다룬 것들이 상당수를 차지한다. 하지만 최근에는 송전 제약(constraints)을 고려한 발전기 예방정비계획에 관한 연구가 행해지고 있기 때문에 발전, 송전과 관련된 시스템 형태로 간주하였다. 예방정비계획을 실시할 때 발전, 송전을 독립적으로 볼 것인지는 차후 사례조사에서 자세히 살펴볼 것이다.

1. 서 론

2. 본 론

일반적으로 전력시스템의 예방정비계획이란 통상 특정 연도에 있어서 각 시스템의 예방정비 시기 및 기간을 결정하는 것을 의미한다. 전력산업 구조 개편 이전, 고전적 개념의 발전기 예방정비계획 문제는 주어진 기간 동안(maintenance horizon) 여러 제약조건을 만족하면서 각 발전기의 보수정비 시간(maintenance time)을 결정하는 최적화 문제로 볼 수 있다. 구조개편 이전의 수직 통합적인 전력산업 구조 하에서 발전기 보수시기가 전력계통의 적절한 신뢰도 유지 또는 전력계통의 비용최소화를 목적함수로서 결정되었을 뿐, 발전회사의 수익성(profitability)을 고려하지 못하였다. 과거 수직통합체제에서의 단일전력회사는 모든 설비를 소유하고 운영하였기 때문에 계통의 모든 정보(발전기 비용합수, 계통운영상황 등)를 이용할 수 있었다. 단일전력회사는 안정적인 전력수급의 책임을 가지고 있었고 공기업 형태로 운영되었기 때문에 계통 정보를 바탕으로 비용최소화, 신뢰도 최대화 등을 목적함수로 사용할 수 있었다. 이러한 성격의 수직통합체제의 단일 전력회사가 행하는 전력시스템의 예방정비계획과는 달리 시장경제 체제가 도입된 전력 계통의 예방정비계획은 다른 의미를 지닌다. 발전회사의 분할 및 경쟁으로 과거의 계통비용최소화 개념의 예방정비계획은 변화하고 있으며, 경쟁시장 체제에서 이익을 최대화하는 발전회사의 입장에서 예방정비계획을 전략적으로 수립하는 방안에 관한 연구가 행해져야한다. 경쟁시장에서 전력시스템의 예방정비계획은 발전회사의 이익을 결정지을 수 있는 전략(strategies)의 일환이다. 즉, 시장참여자는 수직통합체제의 단일 전력회사와는 달리 안정적인 전력수급의 책임을 더 이상 갖지 않는다. 다만 시장 참여자 자신들의 이익극대화에 관심이 있으며 그에 대한 입찰전략, 예방정비계획, 발전개발계획 등을 수립한다. 경쟁시장에서의 발전기 예방정비계획은 각 발전회사가 수익을 극대화하기 위한 중요한 전략적 의사결정 가운데 하나라 간주되기 시작하였는데, 이것은 전력시스템의 예방정비계획이 과거와 같이 한전 또는 규제기관의 단독 주도하에 적정 신뢰도나 비용최소화 관점에서만 전적으로 결정되는 것이 아니라, 발전회사의 의사결정과 규제기관의 조정권한 사이의 상호작용에 의해 결정되게 되는 새로운 상황에 기인한다. 즉, 전력시스템의 예방정비계획은 전력계통의 신뢰도에는 물론이거니와 전력시장의 시장가격에 커다란 영향을 미치게 되고, 발전회사를 포함한 시장참여자의 수익에 막대한 영향을 주기 때문에 수익을 최대화하는 발전회사와 계통 및 시장의 안정을 도모하는 규제기관 사이의 적절한 상호작용에 의해 결정되게 된다.

이후 본론에서는 전력시스템 예방정비계획 문제를 다룬 국내, 국외의 논문에 대한 사례를 분석한다. 해당 논문을 살펴보면, 경쟁시장 이전과 이후의 예방정비계획의 성격이 다를 수 있으며, 발전만 고려한 또는 송전 시스템을 고려했을 경우의 예방정비계획의 특성이 달라짐을 알 수 있었다. 각 논문에서는 전력시스템 예방정비계획을 해석하는 각각의 수학적 알고리즘이 있으며 독자적인 알고리즘을 개발한 경우도 적지 않았다. 본 논문은 경쟁시장에서의 발전 및 송전 관련 전력시스템 예방정비계획을 중심으로 살펴볼 것이다. 예방정비계획을 바라보는 성향에 따라 연구 방향을 다음과 같이 분류할 수 있다. 기본 발전 시스템뿐만 아니라 송전시스템을 고려한 경우 [2, 11, 16, 21], 경쟁시장에서 계통운영자(ISO)의 역할에 관한 연구 [3, 9], 유전알고리즘을 이용한 연구 [6, 13, 19], 뉴럴 네트워크(Neural Network) 및 퍼지(Fuzzy) 이론을 이용한 경우 [8, 16], 예방정비계획 전산화 모형을 개발한 연구 [5, 14] 등으로 살펴볼 수 있다. 이후 본론의 내용에서 국내외의 논문으로 분류하여 각각의 연구 내용에 대해 간략히 살펴본다. 각 논문의 전력시스템 예방정비계획을 해석하는 방향과 이를 분석하기 위한 수학적 모델링 방법을 집중적으로 살펴본다.

2.1 국내 논문

국내논문은 경쟁시장 이전 [6, 7]과 이후 [1, 2, 3, 4]의 연구로 크게 나뉘볼 수 있다. 전력시장 개방 이전의 논문은 신뢰도(Reliability)와 보수비용(maintenance cost)에 집중하여 이를 분석하는 수학적 모형에 집중한다. 유전알고리즘을 이용한 발전계통의 보수계획 수립 [6], 발전기 이상 민감도를 이용한 효율적인 우선순위법의 대규모 예방정비계획 문제에의 적용 연구 [7] 등이 해당된다. 경쟁시장 이후의 연구는 예방정비계획을 실시하는 주체가 단일전력회사에서 발전회사의 시장참여자로 변화하면서 경쟁과 입찰의 성격을 가진다. 또한 송전계통을 고려하고, 경쟁을 규제하는 계통운영자의 역할에 관한 연구도 행해진다. 전력시장의 발전기 보수계획을 고려한 확률적 발전 모델링 [1], 송전계통을 고려한 계통운영자의 발전기 예방정비계획 알고리즘에 관한 연구 [2], 경쟁적 전력시장에서 계통운영자의 발전기 예방정비계획에 관한 연구 [3], 비협조 동적게임이론을 이용한 경쟁적 전력시장의 발전기 보수계획 전략 분석 [4] 등이 경쟁시장 이후의 전력시스템 예방정비계획 관련 연구에 해당됨을 알 수 있었다. 위 논문의 연구 내용에 대해 살펴보면 다음과 같다.

〈표 1〉 예방정비계획 사례연구조사 (국내 논문)

시장 개방 이전	[6]	· LOLP를 최소화하는 보수계획 수립문제의 최적해를 도출 · 전역탐색능력이 있는 유전알고리즘을 이용, 알고리즘의 탐색 성능을 향상시키기 위해 새로운 교배연산자를 제시
	[7]	· 공급예비율 평활화를 목적함수로 선정 · 예방정비계획에 대한 목적함수의 민감도를 발전기별로 정의 발전기의 예방정비실시율 목적함수에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 발전기별 이상 민감도를 계산하는 알고리즘 제시
시장 개방 이후	[1]	· 보수계획을 불확실성으로 모델링, 변화된 전력산업구조에 적용가능한 확률적 발전용량 모델링 방법을 제시, 수요를 클러스터로 그룹화하여 전력시장의 장기분석에 적용할 수 있는 실제적인 방법을 제안
	[2]	· 주 문제: 계통의 신뢰도를 판단하는 기준으로 예비력 사용 · 부 문제: 송전계통을 고려한 보수계획 수립을 위해 최적조류 문제를 다룬

전력산업의 구조개편에 따라, 전력계통의 운용(operation) 및 계획(planning) 분야에도 시장원리에 입각한 다양한 경영상의 의사결정이 이루어지고 있다. 이처럼 전력시스템의 예방정비계획은 전력시장의 구조개편에 따라 새로운 형태로의 변화가 요구된다. 이 시점에서 경쟁시장에서의 전력시스템 예방정비계획 적용사례를 조사하고 연구하는 것은 의미 있는 일이다. 예방정비계획과 관련한 전력 계통상 또는 입찰과 관련한 경제적 관점에서의 제약들이 존재한다. 이러한 선형·비선형 문제들은 결정론적(deterministic)방법, 또는 자기학습과 경험을 바탕으로 하는 수학적 모형(heuristic method)에 의해 해석이 가능하다. 이러한 모형은 예방정비계획을 세우기 위한 목적함수를 해석하는 도구가 된다. 본 논문에 소개되는 사례 연구들이 바라보는 예방정비계획은 무엇이며, 이를 해석하고자 사용되는 수학적 도구는 어떠한 것인지 살펴본다. 또한 각 논문에서 핵심적으로 다루고자 하는 주제가 현재의 경쟁시장과 관련하여 어떠한 의미를 지니는지 살펴본다. 발전량을 중심으로 시장참여자들이 경쟁하는 변동비 반영 시장인 우리나라 전력시장에서 행해지는 발전회사 간의 입찰(bidding)행위만이 전력이 아니며 전력시스템의 운영과 보수시기를 결정하는 예방정비계획 또한 시장참여자의 수익을 극대화할 수 있는 전략의 일환이다. 이러한 관점에서 예방정비계획에 관한 국내, 국외의 관련 연구 사례를 조사하였고 해당 논문의 핵심 내용과 사용된 수학적

시장 개방 이후	[3]	· 계통운영자의 예방정비계획 수립절차를 제시하며, LOLP를 신뢰도 기준, Simulated Annealing algorithm을 이용하여 발전사업자와 계통운영자가 수립한 예방정비계획안의 최소조정을 목적함수 해석
	[4]	· 발전기 보수전략 게임모형의 정식화, 발전기 보수계획 전략을 game-theoretic framework를 통해 분석

2.2 국외 논문

외국 논문의 경우, 경쟁시장 이전과 이후의 구분을 두지 않고 발전 및 송전 관련 전력시스템 예방정비계획을 중심으로, 예방정비계획을 바라보는 성향에 따라 연구방향을 살펴보았다. 국내 논문의 경우와 마찬가지로 전력시스템 예방정비계획 문제를 해결하기 위하여 Neural Network [8], Fuzzy [16], mixed-integer programming [9, 12], Evolutionary theory [16, 19] 등과 같은 수학적 모형을 이용하였고 신뢰도 기준으로 EENS(Expected Energy Not Served), LOLP(Loss of Load Probability) 등을 사용하여 예방정비 시기를 결정하는 경우가 많았다. 보수계획 시기를 결정하는 최적화 알고리즘의 해석 방법에 집중하여 논문을 살펴보면 다음과 같다.

〈표 2〉 예방정비계획 사례연구조사 (국외 논문)

[8]	· Reactive Tabu Search를 이용, Price기반의 발전기 보수계획 제안 · 보수기간의 전기가격 예측을 위해 Feed-Forward ANN 사용 · 불확실한 전기가격을 예측, 발전기 보수계획을 수립하는 게임 제시
[9]	· MR-MS, MP-MS(maximum-reliability, maximum-profit maintenance scheduling)을 목적으로 하는 발전회사와 ISO사이의 발전기 보수계획 알고리즘 제안 · Standard mixed-integer linear programming problems으로 형식화
[10]	· 경쟁시장에서 bidding principle를 발전기 보수계획 문제에 적용, 입찰결과 발생하는 발전기 보수비용과 이익을 발전비용이 최소화하는 방향으로 재조정 · 보수기간의 available maintenance capacity를 공개
[11]	· 경쟁시장에서 ISO의 역할 강조, EENS에 의한 Critical Load Point 개념을 적용, 특정발전기의 보수로 인한 risk를 확인하여 발전, 송전 시스템의 보수가능시기를 구하는 알고리즘 제시
[12]	· 경쟁시장 이전, 이후의 전력시스템 보수계획의 원리 및 수학적 접근법 제시, 시장가격을 고려한 가격(price)이 목적함수로 사용 · Mixed-integer programming simulation
[13]	· 지역적해를 구할 수 있는 Evolutionary Programming을 이용한 보수계획 수립, 보수계획을 constrained optimization problem으로 간주, maintenance + power system constraints를 관련제약으로 고려
[16]	· Fuzzy model을 이용하여 발전, 송전 통합 전력시스템의 보수계획 수립. 부하예측과 연료가격, 보수비용 등의 시스템 관련 불확실성을 Fuzzy Evolutionary programming으로 해석
[17]	· 송전계약의 영향을 고려한 발전기 보수계획의 필요성 강조 · Short-term operation planning 고려 · Bender Decomposition technique 사용
[18]	· 경쟁시장에서 발전기 보수계획 전략을 2-players로 구성된 게임이론적 접근법을 제시, 발전회사의 이익을 최대화하는 전략행위를 분석, 실제 문제로의 접근을 위한 송전네트워크의 제약을 고려, N-players 형태로의 확장 필요성 제시 · Multistage dynamic noncooperative game with complete information
[19]	· 유전알고리즘을 이용하여 보수계획 관련제약을 염색체로 표현, 적합도 함수(fitness function)를 설정, 예방정비계획 시기를 결정
[20]	· 발전한계비용(incremental cost)과 같은 경제적인 개념과 EENS, LOLP를 신뢰도 기준으로 사용하여 발전기 보수시기를 결정 · Monte Carlo simulation algorithm 이용
[21]	· Master problem : 발전기 보수시기를 계획, sub problem에서 transmission, voltage constraints를 고려한 보수시기 조정. 송전-전압 제약이 실제 Line maintenance scheduling에 영향을 주며, 보수비용을 증가시킨, Genetic algorithm을 이용하여 보수계획 문제의 복잡성을 단순화시킴

2.3 전력시스템 예방정비계획의 변화

고전적 개념의 예방정비계획 문제는 주어진 기간 동안 여러 제약조건을 만족하면서 각 시스템의 보수정지 시간을 결정하는 최적화 문제로 볼 수 있다. 보수계획 문제의 해를 구하기 위해, 많은 연구가 수행되었고 다양한 수학적 모형이 제안되었다. 1990년대 이전까지는 발전기 보수계획에 대한 신뢰도 평가방안 및 비용최소화 개념의 최적 보수계획수립 알고리즘에 대한 연구가 주로 수행되었다. 그 이후에는 수학적 모델에 기초한 최적의 발전기 보수계획 수립 알고리즘이 제시되고 있으며, 최근에는 송전계약이나 연료제약 또는 환경제약 등을 고려한 통합적인 발전기 보수계획 기법이 제안된다. [2, 11, 16, 17, 21]. 전력산업 구조개편이 이루어지기 전 수직통합적인 전력산업 구조하에서 발전기 보수계획에 관한 지금까지의 많은 연구는 신뢰도 유지 또는 전력계통의 비용최소화를 목적함수로 결정, 발전회사의 수익성을 고려하지 못하였다. 발전회사의 분할 및 경쟁으로 예방정비계획의 성격은 변화하며, 시장에서 입찰 및 거래를 하는 당사자인 발전회사가 수익

을 극대화하기 위한 중요한 전략적 의사결정 가운데 하나로 간주되기 시작하였다 [1, 3, 4, 18]. 발전회사의 의사결정과 규제기관의 조정권한 사이의 상호작용에 의해 결정되게 되며, 보수계획은 전력계통의 신뢰도뿐만 아니라 미래 전력시장의 시장가격과 발전회사의 증장기 수익에 막대한 영향을 줄 것이다 [4].

3. 결 론

본 논문에서는 경쟁시장에서 전력시스템 예방정비계획 적용사례를 조사, 연구하였다. 예방정비계획 대상을 발전, 송전으로 나눌 수 있으며, 이를 통합한 복합시스템을 고려할 수 있었다. 예방정비계획은 보수시기를 결정하는, 시스템 관련 제약 및 경쟁 입찰 원리에 입각한 제약들로 구성된 최적화 문제이다. 각각의 논문에서는 이를 해석하기 위해 deterministic 또는 heuristic한 수학적 모델을 제시한다. 신뢰도 유지 및 비용최소화를 목적함수로 고려할 뿐만 아니라 최근에는 경쟁 입찰에 의한 발전회사의 수익성을 최대도 하기 위한 연구가 진행되고 있다. 이후 전력시스템 예방정비계획의 연구방향은 부하, 연료가격 등과 같은 불확실한 파라미터의 예측을 위한 수학적 모형의 개발과 이를 실제 전력계통에 적용하려는 노력으로 예상할 수 있다. 본 논문의 취지는 기존 예방정비계획의 연구 성향을 조사하는데 있으며 이는 향후 경쟁전력시장에서 전력시스템 예방정비계획의 연구 방향을 예상하고 분석하는데 유용한 정보를 제공하리라 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김진호, 박종배, "전력시장의 발전기 발전기 보수계획을 고려한 확률적 발전 모델링", Trans. KIEE, Vol. 54A, No. 8, AUG 2005
- [2] 한석만, 신영균, 김발호, "송전계통을 고려한 계통운영자의 발전기 예방정비계획 알고리즘에 관한 연구", Trans. KIEE, Vol. 54A, No. 7, JUL 2005
- [3] 한석만, 신영균, 정구형, 김강원, 김발호, "경제적 전력시장에서 계통운영자의 발전기 예방정비계획에 관한 연구", Trans. KIEE, Vol. 53A, No. 8, AUG 2004
- [4] 김진호, 박종배, 김발호, "비협조 동적게임이론을 이용한 경쟁적 전력시장의 발전기 보수계획 전략분석", Trans. KIEE, Vol. 52D, No. 9, SEP 2003
- [5] 원종률, 윤용범, 박시우, 남재현, "발전기 예방정비계획 전산화모형 개발에 관한 연구", Trans. KIEE, Vol. 48A, No. 11, NOV 1999
- [6] 정정원, 김정익, "유전알고리즘을 이용한 발전 계통의 보수 계획 수립", Trans. KIEE, Vol. 48A, No. 5, MAY 1999
- [7] 박종배, 정만호, "발전기 이상 민감도를 이용한 효율적인 우선순위법의 대규모 예방정비계획 문제의 적용 연구", Trans. KIEE, Vol. 48A, No.3, MAR 1999
- [8] Hiroki Tajima, Junjiro Sugimoto, Ryuichi Yokoyama, "Profit and Cost based Thermal Unit Maintenance Scheduling under Price Volatility", 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China
- [9] Antonio J. Conejo, Raquel Garcia-Bertrand, Manuel Diaz-Salazar, "Generation Maintenance Scheduling in Restructured Power Systems", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 20, No. 2, MAY 2005
- [10] Gao zhihua and Ren zhen, Wushan, Guangzhou, "Competitive Maintenance Scheduling and Settlement Base on Bidding in Electricity Market", IAS 2005
- [11] Roy Billinton, Ran Mo, "Composite System Maintenance Coordination in a Deregulated Environment", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 20, No. 1, FEB 2005
- [12] N. Mohammadi Tabari, S. N. Mahmoudi, S. A. Hassanpour, S. B. Hassanpou, M. Pinnoradian, "Maintenance Scheduling Aided by a Comprehensive Mathematical Model in Competitive Environments", 2004 International Conference on Power System Technology - Powercon 2004 Singapore, 21-24 November 2004
- [13] M. Y. El-Sharkh, A. A. El-Keib, J. Choi, I. Elagtal, "Evolutionary Programming-Based Maintenance Scheduling of Power Generating Units", 8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Iowa State University, Ames, Iowa, September 12-16, 2004
- [14] C. Sharma, S. Bahadoorsingh, "A MATLAB-Based Power Generator Maintenance Scheduler", 2004 IEEE
- [15] Unimihian BASAHAN, "The Strategy For The Maintenance Scheduling Of The Generating Units", 2003 IEEE
- [16] M. Y. El-Sharkh, A. A. El-Keib, "Maintenance Scheduling of Generation and Transmission Systems Using Fuzzy Evolutionary Programming", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 18, No. 2, MAY 2003
- [17] E. L. da Silva, M. Th. Schilling, M. C. Rafael, "Generation Maintenance Scheduling Considering Transmission Constraints", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 15, No. 2, MAY 2000
- [18] Jin-Ho Kim, Jong-Bae Park, Jong-Keun Park, Balho H. Kim, "A new game-theoretic framework for maintenance strategy analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 2, May 2003, pp. 698-706
- [19] Michael Negnevitsky, Galina Kelareva, "Maintenance Scheduling in Power Systems Using Genetic Algorithms", 1999 IEEE
- [20] A.M. Leite da Silva G.J. Anders L.A.F. Manso, "Generator maintenance Scheduling To Maximize Reliability And Revenue", Paper accepted for presentation at PPT 2001 IEEE Porto Power Tech Conference 10th -13th September, Porto, Portugal
- [21] M. K. C. Marwali and S. M. Shahidepour, "Short-Term Transmission Line Maintenance Scheduling in a Deregulated System", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 15, No. 3, AUG 2000